

## ОТЗЫВ

научного руководителя Ластовского С.Б. на диссертационную работу  
Огородникова Дмитрия Александровича  
«Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных  
эффектов в кремниевых приборных структурах»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Диссертационная работа Огородникова Дмитрия Александровича «Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборных структурах» посвящена исследованию влияния ионизирующих излучений на параметры кремниевых МОП/КНИ-структур и интегральных микросхем на их основе, а также кремниевых фотозлектронных умножителей (SiФЭУ) и диодных *p-n*-структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения.

Актуальность темы диссертационной работы определяется применением изделий электронной техники в условиях воздействия ионизирующих излучений. По данной тематике к настоящему времени достигнуты значительные успехи, как в области экспериментальных, так и теоретических исследований. Разработаны методы прогнозирования и повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов, определены природа ряда радиационно-индуцированных центров в кремнии и наиболее вероятные механизмы их образования. В то же время, отечественными предприятиями постоянно осваивается выпуск новых типов полупроводниковых приборов с уникальными характеристиками и возникает необходимость получения информации об особенностях их функционирования в полях ионизирующих излучений. Интегральные схемы на МОП/КНИ транзисторах обладают высоким быстродействием и повышенной радиационной стойкостью. Кремниевые фотозлектронные умножители позволяют регистрировать предельно слабое (вплоть до единичных фотонов) оптическое излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Приведенные в данной работе результаты по изучению радиационных эффектов в МОП/КНИ транзисторах и интегральных схемах на их основе показывают, что степень радиационной деградации параметров существенно зависит от конструктивных особенностей самих изделий, а также электрического режима их облучения. Аналогичное заключение представлено в работе и по темновому току исследуемых опытных образцов SiФЭУ. Для устранения эффекта перекрестных помех ячейки SiФЭУ оптически изолировались металлизированными канавками, и полученные результаты являются новыми в научной литературе. Все вышесказанное потребовало привлечения методов численного моделирования для более детального определения зависимости радиационных эффектов в МОП/КНИ транзисторах и образцах SiФЭУ от их конструкции и режимов облучения.

Каждая ячейка SiФЭУ в рабочем режиме находится под обратным смещением. Возникает закономерный вопрос о влиянии электрического поля в области пространственного заряда *p-n*-перехода на процессы радиационного



дефектообразования в кремнии. Следует отметить, что представленные до этого в научной литературе результаты других авторов не в полной мере давали ответ на поставленный вопрос. Диссертантом показано, что скорость удаления основных носителей заряда в области пространственного заряда кремниевых  $n^+p$ -структур, облучаемых под обратным смещением альфа-частицами, уменьшается по сравнению с нейтральной частью  $p$ -базы. Наблюдаемый эффект связан с высокой термической стабильностью собственных междоузельных атомов кремния в двукратно положительном зарядовом состоянии в материале  $p$ -типа и высокой подвижностью в положительном зарядовом состоянии.

Проведенное Огородниковым Д.А. исследование влияния ионизирующих излучений на параметры кремниевых приборных структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения является важным с научной и практической точек зрения. Полученные Огородниковым Д.А. результаты расширяют фундаментальные знания в области процессов радиационного дефектообразования в кремнии и кремниевых приборах. Они позволяют прогнозировать работу МОП интегральных схем на основе КНИ-структур и кремниевых фотоэлектронных умножителей в условиях воздействия ионизирующих излучений, а также представляют интерес для разработчиков радиационно-стойких изделий.

Диссертационная работа Огородникова Д.А. соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь: направлению – «Технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016 – 2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166), а также направлению – «Микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021 – 2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. №156).

По результатам диссертационной работы Огородникова Д.А. опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, 10 статей в сборниках материалов международных научных конференций и 3 тезиса докладов на международных научных конференциях. Огородников Д.А. неоднократно принимал активное участие в работе республиканских и международных научных конференциях. Результаты его работы нашли практическое применение в ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» при выполнении ряда договоров на общую сумму свыше 110000,0 рублей.

При работе над диссертационной работой Огородников Д.А. проявил себя как вдумчивый, трудолюбивый и способный сотрудник, который постоянно повышает свой научный уровень, проявляет живой интерес к современным научным проблемам, владеет современными методами исследований, численного моделирования и способен самостоятельно ставить и решать научные задачи.

Таким образом, я считаю, что диссертационная работа Огородникова Дмитрия Александровича соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автору, Огородникову Дмитрию Александровичу, может быть присуждена ученая степень



кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников за:

- определение наиболее «жесткого» электрического режима облучения гамма-квантами  $Co^{60}$   $n$ -канальных МОП/КНИ транзисторов, при котором на сток и исток подаётся напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала — 0 В, что связано с эффективным накоплением положительного заряда на границе раздела кремний / захороненный окисел, величину которого удастся существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла транзисторных структур;
- определение зависимости механизма деградации темнового тока при облучении гамма-квантами  $Co^{60}$  кремниевых фотоэлектронных умножителей с оптической изоляцией металлизированными канавками ячеек от электрического режима облучения и конструктивных особенностей приборов и связанного с увеличением поверхностной составляющей обратного тока в результате накопления дырочного заряда в слоях окислов разделительных канавок под действием электрических полей;
- объяснение экспоненциальной зависимости темнового тока от поглощенной дозы гамма-квантов кремниевыми фотоэлектронными умножителями с положительным потенциалом на электроде металла канавок, обусловленной экспоненциальной зависимостью концентрации инверсных электронов вблизи границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> ячеек от поверхностного потенциала, создаваемого положительным зарядом в объеме оксида;
- установление причины снижения до 2-х раз скорости удаления основных носителей заряда в области пространственного заряда по сравнению с нейтральной  $p$ -областью базы в результате облучения альфа-частицами с  $E = 5,1$  МэВ обратно смещенных кремниевых диодных  $n^+ - p - p^+$ -структур, связанной с переходом из стабильного двукратно положительного зарядового состояния в нестабильное однократно основного компенсирующего радиационно-индуцированного дефекта междоузельного атома кремния.

Ведущий научный сотрудник  
отраслевой лаборатории радиационных воздействий  
ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,  
кандидат физико-математических наук , доцент



Подпись \_\_\_\_\_ С.Б. Ластовский  
Удостоверяю \_\_\_\_\_  
Ведущий специалист по кадрам \_\_\_\_\_

08.10.24